# Comparaison des processus d'humification dans les principaux types d'humus forestiers

par **Ph. DUCHAUFOUR** et **F. JACQUIN**

---

SOMMAIRE

*Les processus d'humification diffèrent en milieu acide et en milieu calcaire; en milieu acide, pauvre en calcium, il se forme le plus souvent des moder (ou mor), à décomposition lente de la matière organique fraiche; mais, si les « litières » ont une composition favorable dite « améliorante », la présence d'argile fine et de fer libre actif dans le milieu minéral, induit la formation d'un « mull acide » très riche en composés provenant de l' « insolubilisation » de précurseurs phenoliques solubles. En milieu calcaire, humification et minéralisation sont bloquées à un stade précoce, par suite de la séquestration par les carbonates de complexes lignine-proteine incomplètement humifiés.*

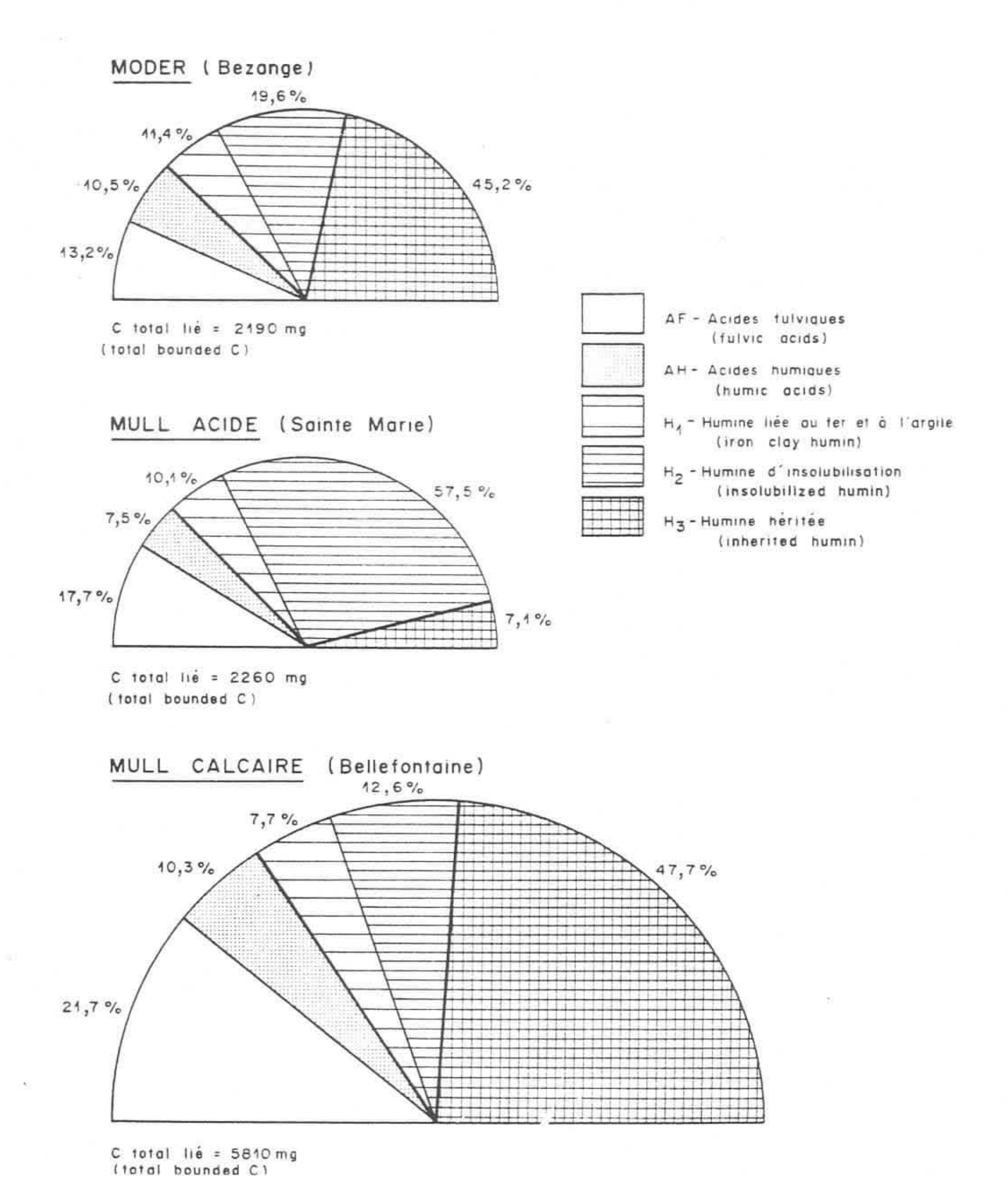
La classification des humus forestiers tempérés distingue de façon classique trois types fondamentaux : mull, moder et mor; en fait, l'étude biochimique montre une parenté incontestable entre les deux derniers types, l'un et l'autre caractérisés par la lenteur de la décomposition des litières (en milieu biologiquement peu actif) et l'accumulation de « produits intermédiaires » encore proches de la matière végétale originelle : seule une différence de **degré** concernant la faible vitesse de décomposition des litières distingue le moder et le mor.

Les humus appelés « mull », au contraire, sont tous caractérisés par une décomposition rapide du matériel végétal originel, aboutissant à la formation d'horizons mixtes, à structure grumeleuse (« agrégats argilo-humiques »), très aérés : **l'humification,** c'est-à-dire la transformation biochimique de la matière organique, est évidemment nettement plus poussée dans ce troisième type d'humus que dans les deux autres.

En fait, une étude micromorphologique et biochimique poussée montre que, malgré une analogie superficielle, les processus de formation des mull sont profondément différents suivant l'activité biologique et le pH du milieu ; c'est sur ce point que nous nous proposons d'exposer quelques idées nouvelles tirées de travaux récents.

## METHODES D'ETUDE.

L'étude que nous présentons sera essentiellement basée sur les méthodes de fractionnement de la matière organique des sols, utilisées au Centre de Pédologie biologique, et qui ont permis de mettre en évidence les trois voies fondamentales de




*Fractions des composés humiques « liés » d'un mull acide, moder, mull calcaire de hêtraie (d'après TOUTAIN, 1974, et CHOULIARAS et* al., *1975)*

*« Bounded » humic compounds of acid mull, moder, calcique mull under beeches (TOUTAIN, 1974, and CHOULIARAS et* al., *1975)*

l'humification : 1) la voie directe par oxydation de certains éléments tels que la lignine, qui reste insoluble, mais acquiert des groupements carboxyles et se lie aux argiles ; 2) la voie indirecte : la matière première végétale est d'abord mise en solution ; les produits solubles, sous l'influence des cations complexés, évoluent vers une forme complexée insoluble et subissent une polymérisation progressive ; 3) une voie essentiellement « microbienne » conduisant à la formation de polysaccharides et d'amino-sucres.

Ces recherches ont été exposées dans une communication présentée antérieurement à l'A.F.E.S. (« Science du Sol », n° 3, 1973). Rappelons que les composés humiques, dits « extractibles » (acides fulviques et acides humiques) résultent essentiellement du deuxième processus. Quant à la fraction non extractible, appelée souvent **humine,** elle est très hétérogène et comporte en fait trois fractions, chacune d'elles ayant emprunté une des trois voies évolutives mentionnées : l'humine résiduelle ou héritée (voie directe), l'humine d'insolubilisation (voie indirecte), l'humine microbienne (troisième voie, néosynthèse microbienne).

**N.B.** — Sur les schémas présentés, l'humine microbienne n'a pas été séparée de l'humine d'insolubilisation. Les symboles ont les significations suivantes :

AH = Acides humiques ; AF = Acides fulviques ; $H_1$ = humine d'insolubilisation extractible après déferrification et destruction des silicates par HCl, HF ; $H_2$ = humine d'insolubilisation non extractible ; $H_3$ = humine héritée (séparable par action des ultrasons et densimétrie).

Précisons qu'il s'agit de la matière organique liée des horizons mixtes $A_1$.

Or, si le degré d'humification est, nous l'avons dit, plus élevé dans les mull que dans les mor, il n'en reste pas moins que la fraction **non extractible,** mais transformée, de l'humus, c'est-à-dire l'humine, représente encore 70 à 75 % de la matière organique totale : toute étude approfondie de la composition d'un humus forestier **doit donc pouvoir apporter des précisions sur la nature de l'humine ou des humines présentes.**

En outre, l'étude de l'origine, de la nature et du devenir des composés hydrosolubles, qu'ils soient hérités des litières ou néoformés, revêt une importance particulière : ces produits solubles sont en effet de nature différente et métabolisés de façon très variable par les organismes, certains ayant tendance à se minéraliser en $CO_2$, $NH_3$, etc. ; d'autres, au contraire, ne sont que partiellement biodégradés, ils laissent un résidu insoluble qui se polymérise plus ou moins rapidement : les premiers sont, rappelons-le, les saccharides, les peptides ; les seconds sont les composés phénoliques : ce sont eux qui fournissent la partie essentielle, non seulement des acides fulviques et humiques extractibles, mais aussi de l'humine dite d'insolubilisation. Comme l'ont montré HANDLEY (1954, 1961), COULSON et **al.** (1960), et plus récemment Van PRAAG (1971), ces composés phénoliques peuvent aussi, dans certains cas, par effet toxique ou « tannant », freiner la décomposition des litières, ou empêcher la minéralisation des composés les plus facilement biodégradables : ceci a été aussi vérifié par TOUTAIN (1974) et SCHVARTZ (1975). **L'importance de la nature et de l'évolution des composés phénoliques des litières est donc essentielle, car elle peut orienter leur décomposition vers un type d'humus déterminé.**

Ces composés phénoliques ont trois origines possibles : 1) héritage de composés préexistant dans les feuilles ; 2) néoformation par dégradation de la lignine (pourriture blanche) ; 3) biosynthèse par transformation microbienne de composés glucidiques : les travaux des microbiologistes et des biochimistes, notamment ceux de HAIDER, MARTIN, MANGENOT, etc., montrent qu'il y a antinomie sur le plan des conditions de milieu entre ces deux dernières origines : la biodégradation de la lignine en monomères solubles est le propre des milieux acides (pourritures blanches), alors qu'au contraire les composés phénoliques néoformés ne sont fabriqués par d'autres microorganismes qu'en milieu neutre : or, l'aptitude à la polymérisation des deux groupes de composés étant très différente, on voit dès maintenant l'importance du pH dans l'orientation de l'humification.

Ceci nous conduira à adopter le pH du milieu comme base de notre exposé : les humus de type mull peuvent en effet se former à tout pH, en particulier dans des milieux très acides et très pauvres en calcium ; mais la composition et les processus biochimiques qui président à la formation des mull diffèrent entièrement suivant le pH : il conviendra donc de distinguer mull acide, mull neutre (ou eutrophe), mull calcaire.

## HUMIFICATION EN MILIEU ACIDE.

C'est ce type d'humification qui a été le plus étudié au C.P.B., puisque en fait, sur des matériaux extrêmement pauvres en calcium comme les grès rhétiens ou certains faciès de grès triasiques, on trouve côte à côte les trois types d'humus forestiers, mull, moder et mor : or, la teneur en calcium du matériau ne joue aucun rôle dans la formation de ces humus, comme cela a été montré par SOUCHIER (1971) et TOUTAIN (1974).

Les recherches statistiques effectuées par TOUTAIN (1974) pour 29 hêtraies croissant sur roche acide dans l'Est de la France, montrent l'importance du rapport $CH_2/C$ total ($H_2$ = **humine d'insolubilisation**) ; ce rapport d'environ 36 dans les mull, passe à 14 dans les moder, 10 dans les mor.

Ce résultat a été confirmé expérimentalement par VEDY (VEDY, 1974 ; VEDY et JACQUIN, 1972) au cours de son expérience de lysimétrie modifiée, conduite dans les Vosges, sur deux matériaux différents, arènes granitiques et grès intermédiaire ; les litières mises à décomposer sont de deux types, « améliorant » (Hêtraie à Fétuque) ou acidifiant (Pineraie à Callune) ; sur le grès, la première litière donne un mull, la seconde un moder : or l'horizon $A_1$ est dans le premier cas environ trois fois plus riche en **composés extractibles** et en **humine d'insolubilisation.** Au contraire, les humus de type moder, formés sur grès sous litière acidifiante, sont beaucoup plus riches que les mull en **humine héritée.**

Il convient de préciser quels sont les **facteurs écologiques** qui induisent ces différences fondamentales de l'humification, et quels sont les processus biochimiques qui interviennent dans les deux cas.

### ECOLOGIE DE L'HUMIFICATION EN MILIEU ACIDE.

Il est facile de s'en faire une idée en comparant les recherches effectuées par VEDY (1973), TOUTAIN (1974) et GUILLET et SOUCHIER (1974).

Le premier de ces chercheurs a comparé expérimentalement, nous l'avons dit, la décomposition de deux litières, sur deux matériaux différents : il a montré que la présence d'argile fine dans le matériau était une **condition indispensable à la formation d'un mull : il ne s'en forme pas sur arène granitique dépourvue d'argile, quelle que soit la litière utilisée.** Si, par contre, la quantité d'argile fine est suffisante (grès à 7 % d'argile), l'action de la litière devient déterminante, le mull ne se formant que sous litière améliorante.

TOUTAIN a complété ces informations en comparant deux Hêtraies, l'une à mull, l'autre à moder, croissant sur un même matériau (grès rhétien) : il a constaté que ce matériau ne différait, dans les deux stations, que par sa teneur en fer libre ; le mull ne se forme que si un certain seuil en fer libre est dépassé ; cet auteur a pu préciser le mode d'action du fer en procédant à des expériences concluantes : **le fer agit en insolubilisant les composés phénoliques et en catalysant ainsi la formation rapide, non seulement d'acides fulviques et d'acides humiques, mais aussi d'humine $H_2$.**

SOUCHIER et GUILLET (1974) ont apporté une précision supplémentaire : **le fer actif est en fait le fer lié aux argiles fines** ce qui confirme le résultat obtenu antérieurement par VEDY.

**Au total, dans les milieux très pauvres en calcium, trois facteurs interviennent pour favoriser la formation d'un mull : deux d'entre eux concernent le milieu minéral, richesse suffisante en argile et en fer libre, le troisième concerne la végétation qui doit être « améliorante », c'est-à-dire suffisamment riche en azote.**

### MECANISMES BIOCHIMIQUES.

Ils ont été mis en évidence par TOUTAIN (1974), aidé par HANRION (1974) et par MANGENOT et **al.** (1972-1974).

Les agents actifs sont des Basidiomycètes, donnant les « pourritures blanches », c'est-à-dire décomposant activement la lignine en **monomères solubles ;** ces champignons sont préférentiellement acidiphiles, mais paraissent être relativement exigeants

en azote : ceci explique que leur activité soit beaucoup plus intense sous litière améliorante (riche en Fétuque) fournissant une quantité importante d'azote : **la production de composés phénoliques solubles est de ce fait trois fois plus forte environ dans les milieux « mull » que dans les milieux « moder » :** mais ces hydrosolubles sont immédiatement insolubilisés par le fer ; ils forment alors une grande quantité de composés humiques, en particulier d'humine d'insolubilisation, qui constituent de très bons ciments responsables des structures en agrégats du mull.

Inversement, dans les moder, la production d'hydrosolubles est faible, l'activité des pourritures blanches étant ralentie (probablement par insuffisance d'azote)) ; de plus, les composés phénoliques libérés ne se polymérisent pas, ou lentement ; ils restent solubles assez longtemps pour pouvoir être entraînés vers le bas du profil : ils jouent, comme l'a montré TOUTAIN, un rôle important dans la **podzolisation.** La lignine n'étant que partiellement solubilisée, subit une transformation incomplète, ce qui explique l'abondance d'humine résiduelle dans les moder par rapport au mull.

On peut alors se demander pour quelle raison on observe de telles différences d'activité des pourritures blanches lorsque la composition de litière est la même : feuilles de Hêtre par exemple (nous avons signalé que les deux types d'humus pouvaient se former en milieu acide sous Hêtraie). TOUTAIN et HANRION (1974) ont pu montrer qu'il s'agissait là encore d'une action indirecte du fer sur la minéralisation de l'azote ; en catalysant la polymérisation des composés phénoliques, le fer libre, s'il est suffisamment abondant, inhibe l'effet toxique ou tannant de ces composés sur la protéolyse : **de ce fait, la production d'azote minéral obtenue « in vitro » est deux à trois fois plus forte dans les mull acides que dans les moder de Hêtraies.** On voit que la stimulation de l'activité de la pourriture blanche peut être aussi bien **directe**, c'est-à-dire liée à la quantité de N minéral apportée par la végétation, qu'**indirecte**, lorsque le fer inhibe l'action des composés tannants et stimule la protéolyse.

## HUMIFICATION EN MILIEU NEUTRE, RICHE EN CALCIUM.

Les conditions écologiques et biochimiques de l'humification changent entièrement. Les microflores acidiphiles, à base de Basidiomycètes, voient leur activité diminuer au profit de celle des champignons neutrophiles (**Penicillium, Stachybotrys,** etc.) qui ont la propriété, comme l'ont montré MARTIN et HAIDER (1967) de synthétiser des composés phénoliques foncés, à polymérisation rapide, de type « mélanine » ; le rôle du fer qui était essentiel en milieu acide passe au second plan, alors que le calcium joue un rôle déterminant en relevant le pH ; **mais c'est surtout sous la forme de carbonate actif** qu'il intervient en bloquant les transformations à un stade précoce.

Nous ne parlerons que pour mémoire des **mull eutrophes** formés en milieu riche en calcium, mais non calcaire ; ces humus constituent un type exactement **intermédiaire** entre le mull acide et le mull calcique ; l'activité des pourritures blanches diminue considérablement alors que celle des champignons mélanisants est voisine de son optimum : dans ces conditions, les voies de l'humification sont multiples ; le fractionnement montre un équilibre entre les différentes fractions, acides fulviques, acides humiques, et les trois types d'humine ; les composés phénoliques n'exercent pas d'action toxique et leur polymérisation est rapide : dans ces conditions, la protéolyse est satisfaisante, de sorte que les conditions de nutrition azotée des plantes sont voisines de leur optimum. Nous insisterons surtout sur l'action du calcaire actif, donc sur l'humification qui caractérise les mull dits « calciques ».

### PROPRIETES ET EVOLUTION DES MULL CALCAIRES.

Le fractionnement des composés humiques des mull calcaires, effectué par CHOULIARAS et **al.** (1975), donne, par comparaison avec le mull acide et le moder, des renseignements très significatifs (voir figure).

1) La quantité de matière organique globale des horizons $A_1$ des mull calciques est plus forte que pour les mull acides et les moder ; l'écart s'accentuerait si on prenait en considération l'épaisseur des horizons, nettement plus importante pour les mull calciques.

2) Dans la fraction extractible, les acides fulviques sont particulièrement abondants.

3) **L'humine d'insolubilisation** (qui, dans le schéma, n'est pas séparée de l'humine microbienne) **est minoritaire par rapport à l'humine héritée.**

Précisons que la proportion de « surnageant » obtenu par fractionnement densimétrique (c'est-à-dire la matière organique très proche de la matière organique originelle et peu liée à la matière minérale) n'a pas été figurée sur les diagrammes. Ce surnageant a des propriétés très semblables à celles de l'humine héritée $H_3$ : or, il est, comme $H_3$, plus abondant dans le moder et dans le mull calcique que dans le mull acide.

L'expérience de TOUTAIN (1974) mentionnée ci-dessus confirme l'action du calcaire actif : **alors que l'adjonction à un moder de fer actif augmente la proportion d'humine d'insolubilisation, l'adjonction de calcaire actif provoque au contraire sa décroissance plus ou moins rapide en cours d'incubation.**

Ainsi, malgré la grande activité de la microflore du mull calcique, la présence de calcaire actif a pour effet de bloquer l'humification à un stade précoce : le calcaire actif provoque, comme le fer, une insolubilisation des précurseurs solubles ; mais, à la différence des composés insolubilisés par le fer, ceux qui sont insolubilisés par le calcaire restent extractibles après une simple décarbonatation : il s'agit d'acides fulviques ou d'acides humiques, non d'humine.

L'abondance de matière fraîche (surnageant) et d'humine héritée $H_3$ peut surprendre dans un milieu considéré, à juste titre, comme étant biologiquement très actif ; les observations de CHOULIARAS et **al.** (1975), effectuées au Stereoscan, montrent qu'il s'agit d'une véritable **séquestration** de matière organique par le calcaire actif, qui enrobe d'une pellicule protectrice certains débris végétaux, ou même des filaments mycéliens.

La ligninolyse est donc fortement modifiée en milieu calcaire par rapport aux milieux non calcaires ; la production des produits solubles est beaucoup moins importante ; la molécule de lignine est moins fragmentée, elle reste insoluble, mais elle acquiert des groupements fonctionnels qui lui permettent de contracter des liens chimiques d'une part avec les argiles, d'autre part avec les chaînes peptidiques. A ce propos, TOUTAIN (1974) a montré qu'il existait des liens difficiles à dissocier, entre les composés azotés et la lignine des humines $H_3$. Ceci confirme les recherches de GRABBE et HAIDER (1971) qui ont constaté que, dans les composés humiques non extractibles de certains humus très actifs, 80 à 90 % de l'azote est lié à la lignine faiblement transformée : ils utilisent le terme, déjà proposé par WAKSMAN en 1936, de « lignine-protéine ».

Dans ces conditions, il est facile de comprendre que la séquestration de la lignine non ou peu transformée par le calcaire actif exerce une grande influence sur le cycle de l'azote : **une partie des protéines est ainsi soustraite à la protéolyse et à l'ammonification ;** les recherches les plus récentes ont montré qu'effectivement le **taux de minéralisation de l'azote** des mull calciques, mesuré par incubation à l'étuve en 6 semaines, est environ moitié de celui du mull mésotrophe (peu acide mais non calcaire). Ceci a été vérifié par HERBAUTS (1974) et LE TACON (thèse en cours).

On peut donc affirmer que le calcaire actif agit en ralentissant à la fois les processus d'humification et de minéralisation : ceci explique les caractères particuliers des rendzines, toujours très riches en humus : la quantité de matière organique du profil diminue par accélération des processus de biodégradation, quand les carbonates ont été éliminés **(brunification des rendzines).**

## CONCLUSION.

C'est dans les milieux de type mull modérément acides, que les processus de biodégradation de la matière organique fraîche, et de minéralisation du carbone et de l'azote sont les plus actifs ; les composés humiques formés sont labiles, ils ne s'accumulent pas dans le profil.

Dans certains milieux très acides et très pauvres en calcium, ces caractéristiques essentielles sont conservées si deux conditions sont remplies : présence de fer actif lié aux argiles fines, litière végétale suffisamment riche en N minéralisable : le fer relaye

en quelque sorte le calcium dans les milieux pauvres en cet élément, pour favoriser la formation des « mull acides ».

Assez paradoxalement, on note que les processus d'humification et de minéralisation sont fortement ralentis dans les milieux extrêmes : 1) milieux très acides, pauvres en fer, à matériel végétal difficilement biodégradable (moder ou mor) ; 2) milieu contenant du calcaire actif (mull calcique). Dans les deux cas, la matière organique peu transformée a tendance à s'accumuler (humine $H_3$ en particulier) ; dans les deux cas aussi, l'activité minéralisatrice de l'azote baisse, mais pour des causes différentes, le blocage de la minéralisation étant le fait des polyphénols solubles, dans le moder, de la lignine dans les mull calcaires.

Malgré ces analogies, les moder et les mull calciques ont des caractères morphologiques qui s'opposent entièrement : la forte activité animale des mull calciques favorise la formation d'un complexe argilo-humique très stable, alors même que l'humus est peu évolué ; à l'opposé l'incorporation de la matière organique ainsi que la formation d'agrégats sont évidemment très incomplètes dans les moder, à activité biologique beaucoup plus faible.

Reçu pour publication : décembre 1974.

## COMPARISON OF HUMIFICATION PROCESSES IN THE MAIN TYPES OF FOREST HUMUS

## SUMMARY

*Firstly, the author summarises the two important types of humification:*

1° Direct, *by the rapid change of fresh organic matter (especially lignin) into humus, so-called «inherited».*

2° Indirect *by chelting effect with cations and insolubilising more or less soluble precursors (fulvic acids, humic acids, insolubilising humin). Modern fractionating processes allow the composition of the humiferous horizons to be determined and divided into its different constituents as shown in the attached figure. Then the author gives a comparison of the humification processes which occur in three types of forest humus, selected from the most characteristic:*

1. Moder, *formed under «acidifying» vegetation, or in a medium which is low in iron and fine clay; the fresh organic matter decomposing slowly, «inherited» humin being abundant. There is an average level of production of soluble phenolic compounds, but since they are not made completely insoluble by iron, they can migrate in depth and cause podzolisation.*

2. Acid Mull, *formed under «improving» vegetation and on material which is adequately rich in iron and fine clay; enhanced by the strong production of mineral nitrogen, the white rots decompose the lignin rapidly into more abundant soluble compounds than in the moder; but these are rapidly and completely insolubilised by active iron, so that the «insolubilising» humic compounds are abundant: a large part of these compounds escape the action of normal extraction reagents (insolubilising humin). On the other hand humins of the «inherited» type disappear rapidly.*

3. Calcic Mull, *formed in the presence of active carbonates has a very different development: humic compounds insolubilised by the limestone (fulvic and humic acids) remain easily extractable, after decarbonisation. Direct humification by oxidation of the lignin produces a large quantity of «inherited» humin*

*which escapes biodegradation, due to coating and sequestration by the active limestone: this sequestration also concerns part of the proteins linked to the lignin, which slows the production of mineral nitrogen.*

*In conclusion, it will be noticed that the processes of mineralisation and humification are slowed down in extreme environments: either very acid and of low biological activity: or calcareous, by blocking on early stage of incompletely transformed humic complexes.*

## Bibliographie


CHOULIARAS N., PORTAL J.-M., VEDY J.-C. (1975). — Fractionnement et caractérisation de la matière organique dans les rendzines. **Bull. E.N.S.A.I.A.** (sous presse).

COULSON C.B., DAVIES R.I., LEWIS D.A. (1960). — Polyphenols in plant, humus and soil. I. Polyphenols of leaves, litter, and superficial humus from mull and mor sites. II. Reduction and transport by polyphenols of iron in model soil columns. **The J. of Soil Sci., 11** (1), 20-29 et 30-44.

DUCHAUFOUR Ph. (1973). — Action des cations sur les processus d'humification. **Science du Sol, 3**, 151-163.

FLAIG W., KUSTER E., HAIDER K., BEUTELSPACHER G., FILIP Z., MARTIN J.-P. (1971). — Influence of clay minerals on the formation of humic substances by some soil Fungi. **Pochvovedeniye, 6**, 51-59.

GRABBE K., HAIDER K. (1971). — Die Huminstoffbildung und der Stickstoffumsatz bei der Bereitung des Kultursubstrats und während des Wachstums von **Agaricus bisporus. Zeitsch. f. Pflanzenernäh. Bodenk, 129** (3), 216-226.

GUILLET B., ROUILLER J., SOUCHIER B. (1975). — Podsolisation and clay-migration in spodosols of Eastern, France. **Geoderma** (sous presse).

HANDLEY W.R.C. (1954). — Mull and mor formation in relation to forest soils. Forestry Comm., Bull. **n° 23**, Londres, 116 p.

HANDLEY W.R.C. (1961). — Further evidence for the importance of residual leaf protein complexes in litter decomposition and the supply of nitrogen for plant growth. **Plant and Soil, 15** (1), 37-73.

HANRION Myriam (1974). — Contribution à l'étude de l'évolution des hydrosolubles organiques de Hêtre en milieu acide. Thèse de Spécialité, Nancy.

HERBAUTS J. (1974). — Evaluation de la disponibilité potentielle en azote minéral dans différents types forestiers lorrains. D.E.A. de Pédologie, Nancy.

LE TACON F. (1975). — Thèse Doctorat d'Etat, Nancy (rédaction en cours).

MANGENOT F. (1974). — Données complémentaires concernant le pouvoir ligninolytique des sols. **Annali di Microbiologia** (sous presse).

MANGENOT F., KIEFFER E. (1972). — Pouvoir ligninolytique des sols de la R.C.P. 40. **Rev. Ecol. Biol. Sol, 9** (1), 21-39.

MARTIN J.P., HAIDER K. (1971). — Microbial activity in relation to soil humus formation. **Soil Science, 111** (1), 54-63, numéro spécial Matière organique.

SCHVARTZ Ch. (1975). — Thèse Docteur Ingénieur, Nancy (rédaction en cours).

SOUCHIER B. (1971). — Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). Thèse Doctorat d'Etat, Nancy.

TOUTAIN F. (1974). — Etude écologique de l'humification dans les Hêtraies acidiphiles. Thèse Doctorat d'Etat, Nancy.

Van PRAAG H.J. (1971). — Contribution à l'étude de la disponibilité de l'azote et du soufre dans les sols forestiers oligotrophes de l'Ardenne. Thèse Doctorat, Gembloux, 279 p.

VEDY J.-C. (1973). — Relations entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide. Thèse Doctorat d'Etat, Nancy.

VEDY J.-C., JACQUIN F. — Formation « in situ » d'horizons humifères sur « matériau acide » en présence de litières améliorante ou acidifiante. **Science du Sol, 2**, 103-113.